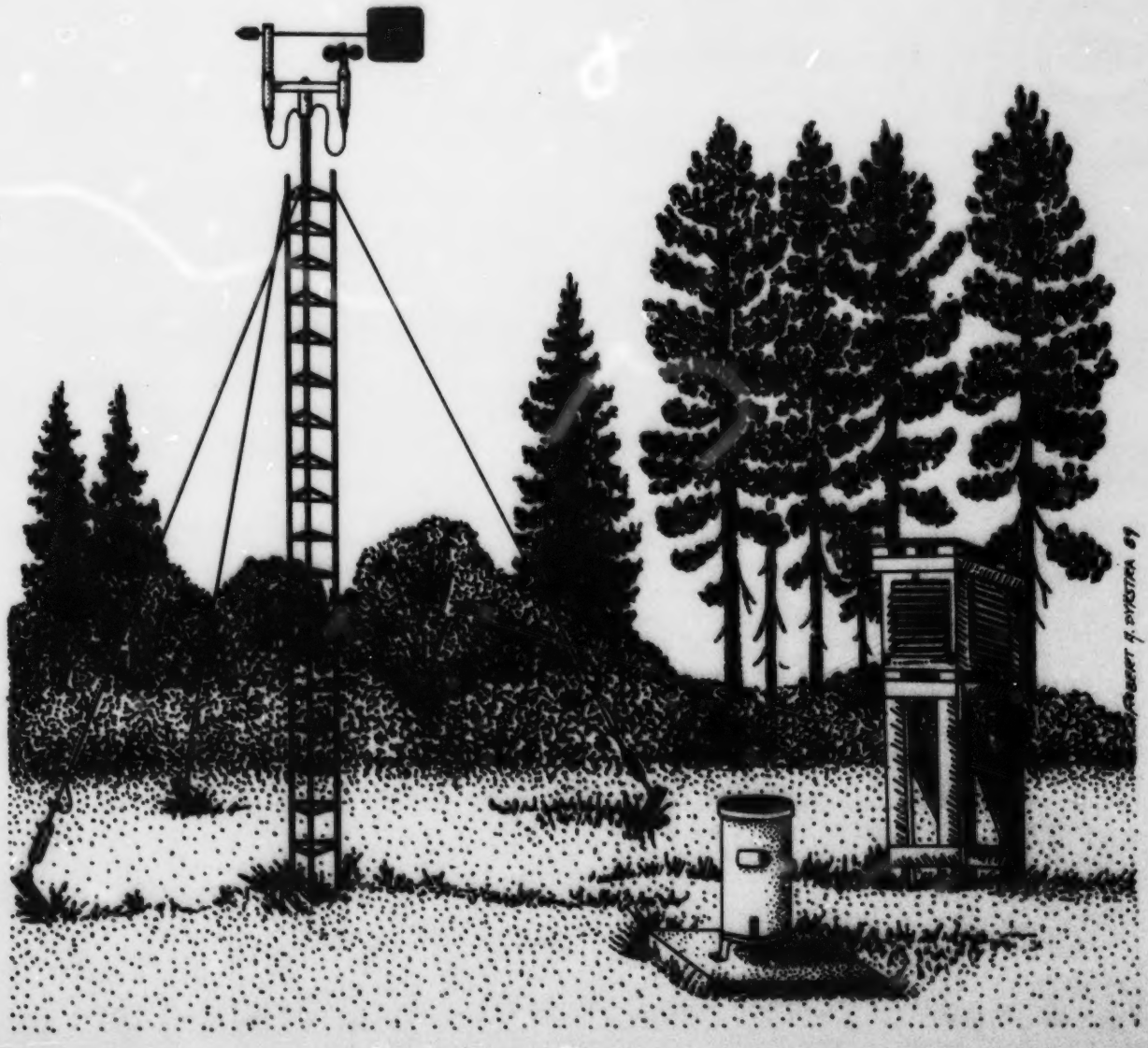
Forêts Canada Forestry Canada

Mesure de l'humidité relative pour l'évaluation des risques d'incendie au Canada

M.D. Flannigan et P.J. Litwin

Rapport d'information PI-X-93F
Institut forestier national de Petawawa



INSTITUT FORESTIER NATIONAL DE PETAWAWA

Le mandat de l'Institut forestier national de Petawawa (IFNP), comme celui des autres établissements de Forêts Canada, est de promouvoir une meilleure gestion et une utilisation plus rationnelle des ressources forestières du Canada, pour le bien économique et social de tous les Canadiens. Les objectifs des programmes menés à l'Institut appuient ce mandat à travers la découverte, le développement, la démonstration, l'application et le transfert des innovations. En tant qu'institut national, il doit s'attacher à des problèmes qui débordent le cadre régional ou qui nécessitent des compétences particulières de même qu'un équipement non disponible aux installations régionales de Forêts Canada. La plupart du temps, les recherches sont effectuées en étroite collaboration avec le personnel des centres régionaux, des services forestiers des provinces et de l'industrie forestière.

Les travaux de recherche et les services techniques de l'Institut sont regroupés autour de cinq principales activités:

GÉNÉTIQUE FORESTIÈRE ET BIOTECHNOLOGIE — Ce programme encadre des études sur la génétique forestière, la microbiologie, la micropropagation, la génétique moléculaire et la recherche sur les semences. Il comprend également les services à la clientèle et la banque de semences du Centre national de semences forestières. Lié à plusieurs organismes internationaux, ce centre existe depuis longtemps.

SYSTÈMES D'AMÉNAGEMENT FORESTIER — Ce programme intègre en recherche et développement des opérations concernant les incendies de forêt, la télédétection, la météorologie, la modélisation, la croissance, la récolte et le relevé des insectes et des maladies des arbres (RIMA). Il permet ainsi l'élaboration et la démonstration de systèmes d'aménagement forestier.

STATISTIQUES NATIONALES SUR LES RESSOURCES FORESTIÈRES — Ce programme fournit les renseignements biologiques, techniques et socio-économiques sur les ressources forestières du Canada. Il vise le développement des bases de données et l'établissement de nouveaux logiciels et bases de données pour aider à l'élaboration des politiques forestières. Le Programme d'inventaire forestier recueille l'information sur les forêts au niveau national, maintient le Système sur les ressources forestières canadiennes et prépare l'inventaire des forêts du Canada.

COMMUNICATIONS — Ce programme regroupe les services offerts par la bibliothèque, les travaux touchant la sensibilisation du public, les renseignements, la rédaction-révision et les publications. L'Institut reçoit plus de 20 000 visiteurs chaque année. Le Centre d'accueil, des visites autoguidées et un programme éducatif complet sont ouverts à tous. C'est à l'IFNP que l'on trouve l'entrepôt et le centre de distribution national de toutes les publications scientifiques de Forêts Canada.

LA FORÊT EXPÉRIMENTALE — Outre des peuplements naturels où l'on applique divers traitements dans le cadre des plans de recherche en sylviculture, la Forêt de Petawawa, mesurant 100 km^2, comprend de vastes superficies de plantations âgées de plus de 60 ans. Les plantations expérimentales livrent des données sur la croissance et la récolte à la suite des expériences de culture. Elles fournissent aussi du matériel génétique dont le lignage est répertorié et qui se révèlent de plus en plus utiles pour les études sur la micropropagation et la génétique moléculaire. C'est un lieu par excellence pour mettre à l'essai des stratégies d'aménagement forestier à court et à long termes.

MESURE DE L'HUMIDITÉ RELATIVE POUR L'ÉVALUATION DES RISQUES D'INCENDIE AU CANADA

M.D. Flannigan et P.J. Litwin

Rapport d'information PI-X-93F
Institut forestier national de Petawawa
Forêts Canada
Chalk River (Ontario)
1989

90-02801/

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada, 1989
N° de catalogue Fo46-11/93-1989F
ISBN 0-662-95723-7
ISSN 0228-0736
Imprimé au Canada

Il est possible d'obtenir sans frais des exemplaires de cette publication auprès de :

Forêts Canada
Centre d'information technique et de distribution
Institut forestier national de Petawawa
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

Téléphone : 613-589-2880

Des copies ou des microfiches de cette publication sont en vente à l'adresse suivante :

Micromédia Ltée
Place du Portage
165, rue Hôtel-de-Ville
Hull (Québec)
J8X 3X2

This publication is also available in English under the title
Relative humidity measurement for fire danger rating in Canada.

Table des matières

v Résumé/Abstract

1 Introduction

1 Méthode

4 Résultats

9 Discussion

10 Remerciements

10 Références

Tableaux

7 1. Erreur quadratique moyenne (EQM) et biais pour différentes méthodes de calcul de l'humidité relative dans tous les cas et lorsque l'humidité relative est faible (humidité relative < 60 %).

7 2. Erreur quadratique moyenne et biais pour l'humidité relative calculée d'après les températures mesurées dans l'abri non ventilé dans différentes conditions en utilisant des thermomètres secs et mouillés.

Figures

2 1. Instruments utilisés dans l'abri ventilé.

2 2. Instruments utilisés dans l'abri non ventilé.

5 3. Humidité relative calculée à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans un abri non ventilé, comparée à celle d'un abri ventilé en utilisant le coefficient psychrométrique $A = 6{,}4309 \times 10^{-4}\ (^{\circ}C)^{-1}$. Les valeurs tracent une ligne droite.

5 4. Humidité relative calculées à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans un abri non ventilé, comparée à celle d'un abri ventilé en utilisant le coefficient psychrométrique corrigé $A = 7{,}7170 \times 10^{-4}\ (^{\circ}C)^{-1}$ pour l'abri non ventilé et le coefficient $6{,}4309 \times 10^{-4}\ (^{\circ}C)^{-1}$ pour l'abri ventilé.

5 5. Humidité relative mesurée à l'aide d'un thermohygromètre dans l'abri ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

5 6. Humidité relative mesurée à l'aide du thermohygromètre n° 1 dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

6 7. Humidité relative mesurée à l'aide du thermohygromètre n° 2 dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

6 8. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du dispositif Vaisala dans l'abri ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

6 9. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du dispositif Vaisala dans l'abri non ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

6 10. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du détecteur PCRC-11 dans l'abri non ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

8 11. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps ensoleillé.

8 12. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps nuageux.

8 13. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps calme.

8 14. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps venteux.

12 Annexe 1

Les produits dont la marque de fabrique est mentionnée dans le présent rapport ne sont pas nécessairement préconisés par Forêts Canada ni par ses employés.

Résumé

Les températures des thermomètres secs et mouillés, installés dans des abris ventilés et non ventilés, peuvent servir à obtenir des valeurs réalistes de l'humidité relative à condition que le coefficient psychrométrique indiqué soit utilisé. Toutefois, les valeurs obtenues dans le cas des abris non ventilés peuvent être considérablement erronées lorsque le temps est ensoleillé ou calme.

Nos recherches ont permis de constater que, pour mesurer l'humidité relative sur le terrain, les thermohygromètres ne donnaient pas de bons résultats, au contraire du bon fonctionnement du détecteur PCRC-11 et du dispositif Vaisala.

Il faudrait effectuer une étude sur la sensibilité de l'indice forêt-météo en ce qui concerne l'humidité relative. Nous proposons également de remplacer les tables des valeurs de l'humidité relative par l'équation Goff-Gratch. Enfin, d'autres solutions devraient être étudiées, comme l'application de la température du point de rosée pour obtenir l'humidité relative ou bien l'automatisation du système.

Abstract

Wet and dry bulb temperatures from ventilated and non-ventilated screens can be used to obtain realistic values of relative humidity provided the appropriate psychrometric coefficient is used. However, relative humidity from non-ventilated screens are subject to significant error when the weather is sunny or calm.

Our investigations revealed that thermohygrometers are poor for field measurement of RH whereas the PCRC-11 sensor and Vaisala humicap performed well.

There is a need for a sensitivity study of the Fire Weather Index with respect to relative humidity. We would also suggest the relative humidity lookup table be replaced by the Goff-Gratch equation. Finally, alternatives like using dewpoint temperature to obtain relative humidity or automating the system should be investigated.

Introduction

L'humidité relative est une des nombreuses variables qui servent à indiquer la quantité d'humidité présente dans l'atmosphère. L'humidité relative (HR) est le rapport, en pourcentage, entre la pression partielle (e) de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de saturation $e_s(T)$ de la vapeur d'eau pour une température donnée de l'air (T).

$$HR = \frac{e}{e_s(T)} \times 100 \qquad [1]$$

L'humidité relative, la température, la vitesse du vent et les précipitations sur une période de 24 heures servent à calculer l'indice forêt-météo[1] (IFM) de la méthode canadienne (Service canadien des forêts, 1984; Van Wagner et Pickett, 1985; et Van Wagner, 1987). Comme l'IFM est utilisé partout au Canada, la plupart des provinces ont mis sur pied un réseau de stations météorologiques pour recueillir des données. Les instruments qui servent à mesurer ces variables ne sont pas uniformisés, et c'est le cas particulièrement de l'humidité relative.

L'humidité relative a toujours été calculée en mesurant la température des thermomètres secs et mouillés[2] dans un abri Stevenson. Pour cela, certains organismes provinciaux de protection contre les incendies utilisent des abris non ventilés au lieu d'abris ventilés. La présente étude avait pour objectif initial de comparer l'humidité relative calculée d'après les valeurs obtenues dans des abris ventilés, par comparaison avec les abris non ventilés, mais son champ a été élargi afin de comparer les méthodes et les instruments divers utilisés couramment par les organismes canadiens de protection contre les incendies pour mesurer ou calculer l'humidité relative.

Méthode

L'étude a été réalisée à l'Institut forestier national de Petawawa (46°01' de latitude Nord, 75°27' de longitude Ouest) dans une clairière forestière appelée "Branstead Field". Cette clairière d'environ 3 ha, d'une inclinaison douce de 30°, est entourée d'arbres dont la hauteur va jusqu'à 25 m. Elle ne satisfait pas aux normes de l'Organisation météorologique mondiale (OMM, 1968) se rapportant aux stations météorologiques forestières, selon lesquelles une clairière doit avoir un diamètre au moins dix fois plus grand que la hauteur des arbres qui l'entourent. Toutefois, les auteurs sont d'avis que la superficie de la clairière où l'étude a été effectuée est suffisante pour obtenir des valeurs représentatives de l'humidité relative.

Deux abris du type Stevenson ont été installés dans la clairière, l'un ventilé avec un ventilateur électrique (figure 1) et l'autre non ventilé (figure 2). Dans les deux abris, on a placé des thermomètres à mercure secs et mouillés ainsi que des thermistors reliés à un enregistreur de données du type Campbell Scientific CR21. La température et l'humidité relative ont été mesurées dans les deux abris à l'aide d'un dispositif portatif du type Vaisala HMI31. Le dispositif Vaisala est un détecteur à polymère capacitif qui fonctionne selon le principe que la capacitance du polymère solide change en fonction de l'humidité absorbée (humidité relative). Dans l'abri ventilé, un thermohygromètre fabriqué par Enercorp a été installé. Il fonctionne d'après le principe qu'un cheveu humain s'allonge ou rapetisse en fonction de l'humidité relative. Ce changement se traduit par une déflection de l'aiguille. Dans l'abri non ventilé, deux thermohygromètres ainsi qu'un détecteur d'humidité relative et de température (Campbell Scientific, modèle 201 PCRC-11) ont été installés. Le détecteur à impédance électrolytique PCRC-11 fonctionne selon le principe que l'impédance de l'électrolyte liquide ou de la plaquette de plastique traité change en fonction de l'humidité absorbée (humidité relative). Dans le cas du thermhygromètre et du dispositif Vaisala, l'humidité relative a été lue directement. En ce qui concerne le détecteur PCRC-11, on a eu recours à un enregistreur de données.

Les autres détecteurs utilisés pour les fins de l'étude étaient un pyranomètre du type Kipp and Zonen CM5 Moll-Gorczynski et deux anémomètres à trois coquilles du type R.M. Young, modèle 1202 Gill; l'un installé à 10 m de

---

1 L'IFM comprend trois indices d'humidité et deux indices intermédiaires. Les trois indices d'humidité représentent la teneur en humidité des combustibles légers (indice du combustible léger, ICL), des couches de matières organiques légèrement compactes qui se décomposent (indice de l'humus, IH) et des couches profondes et compactes de la matière organique (indice de sécheresse, IS). Les deux indices intermédiaires, dérivés des indices d'humidité et du vent de surface, représentent la vitesse de propagation du feu (indice de propagation initiale, IPI) et la quantité totale des combustibles disponibles (indice du combustible disponible, ICD). À l'aide des deux indices intermédiaires, on obtient l'IFM représentant l'intensité de l'incendie qui se propage.

2 La température du thermomètre mouillé est la plus basse température à laquelle l'air est refroidi en évaporant de l'eau sous une pression atmosphérique constante. Le détecteur de température est entouré d'une mousseline propre mouillée et aéré au moyen d'un ventilateur ou par rotation manuelle.

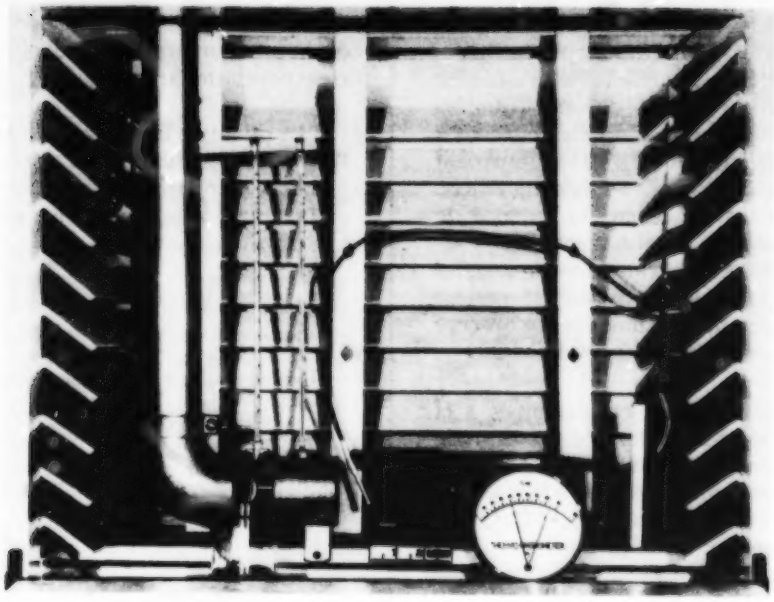


Figure 1. Instruments utilisés dans l'abri ventilé.

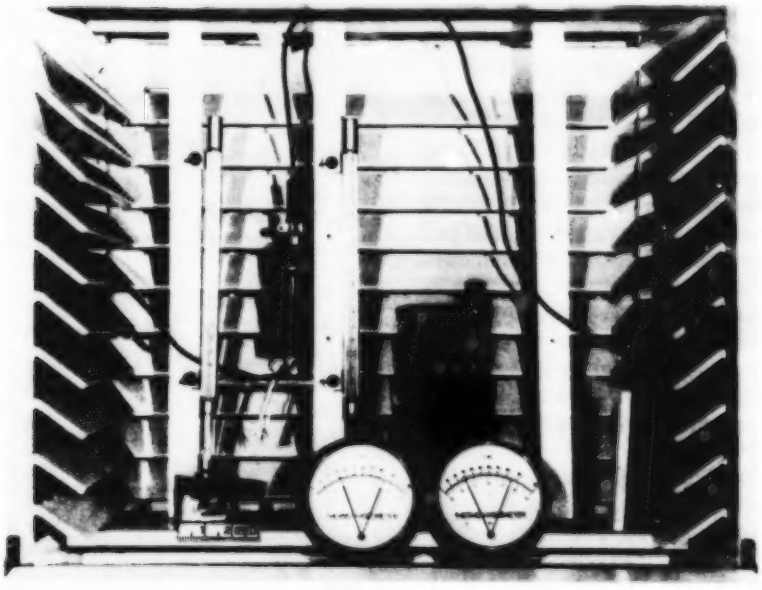


Figure 2. Instruments utilisés dans l'abri non ventilé.

haut, l'autre à la hauteur de l'abri qui était situé à 1,5 m au-dessus du sol. Une girouette (R.M. Young, Gill Microvane, modèle 12305) a aussi été installée à 10 m au dessus du sol. Tous les détecteurs mentionnés plus haut étaient reliés à l'enregistreur de données CR21. Le rayonnement solaire et la vitesse du vent ont été mesurés afin de déterminer leur influence sur la mesure de l'humidité relative dans l'abri non ventilé. La superficie de la clairière était censée avoir un effet sur la vitesse et la direction du vent dans une distance de 10 m; en fait, les auteurs ont observé des vents tourbillonnants à Branstead Field.

Les instruments avaient été étalonnés à la fabrique, mais ils ont tous été vérifiés avant l'étude qui a commencé au début de mai. Les détecteurs d'humidité relative ont été vérifiés dans des chambres à solution chimique à l'aide de LiCl à 25° C, ce qui donnait une humidité relative de 12 %, et de K_2SO_4 à 25° C, ce qui donnait une humidité relative de 96,9 %.

Entre le 2 mai et le 13 septembre 1988, les températures des thermomètres secs et mouillés de même que l'humidité relative ont été mesurées tous les jours, du lundi au vendredi inclusivement, à 8 h 00, 10 h 00, 12 h 00, 14 h 00, HNE. L'enregistreur de données CR21 a mémorisé les moyennes de températures pour une période de 10 minutes, l'humidité relative (mesurée à l'aide du détecteur PCRC-11), le rayonnement solaire ainsi que la vitesse et la direction du vent à l'aide des échantillons prélevés pendant une minute. Pour mesurer l'humidité relative, nous avons employé les méthodes d'observation établies par l'OMM (1983). Au total, 242 observations ont été effectuées au cours de l'étude dont la durée correspond approximativement à la saison des incendies de forêt dans la plupart des régions du Canada. L'humidité relative a été lue directement à l'aide d'un détecteur ou calculée à partir des températures des thermomètres secs et mouillés.

Pour calculer l'humidité relative en lisant les températures des thermomètres secs et mouillés, on substitue l'équation de Regnault

$$e = e_s(T_w) - Ap(T-T_w) \qquad [2]$$

à l'équation [1] où e est la pression de vapeur, $e_s(T_w)$ est la pression de saturation de la vapeur d'eau à la température du thermomètre mouillé (en ° K), T est la température du thermomètre sec, T_w est la température du thermomètre mouillé, p est la pression atmosphérique, et A est le coefficient psychrométrique.

Le calcul de la pression de saturation (e_s) est l'aspect le plus difficile de cette équation. On peut établir un rapport entre la pression de saturation et la température en intégrant l'équation de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{1}{e_s}\frac{de_s}{dt} = \frac{\varepsilon L}{RT^2} \qquad [3]$$

où L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, R est la constante des gaz pour l'air sec, et ε est le rapport entre le poids moléculaire de la vapeur d'eau et celui de l'air sec. L'intégration de l'équation [3] est compliquée en raison des exceptions à la loi des gaz parfaits et du fait que L, la chaleur latente, varie en fonction de la température. Pour calculer e_s, des équations empiriques ont été formulées par Goff et Gratch (1945) ainsi que par Goff (1965). Le calcul a été perfectionné par Wexler (1976 et 1977) ainsi que par Hyland (1985). Un certain nombre de chercheurs ont formulé des équations plus simples permettant de calculer e_s (p. ex. Blackadar, 1983; Fan et Witing, 1987; Magnus, 1844; Revfeim et Jordan, 1976; Tabata, 1973). Toutefois, nous avons préféré ne pas examiner ces équations simples pour les raisons suivantes:

ces équations ne sont pas aussi justes que les équations complexes;

Abbott et Tabony (1985) ont déjà examiné un certain nombre de ces équations simples.

Au Canada, les organismes de protection contre les incendies se servent des tables psychrométriques produites en 1976 par le Service canadien de l'environnement atmosphérique. Ces tables sont fondées sur les équations de Goff-Gratch. Dans notre étude, nous ne les avons pas utilisées; nous nous sommes servis des équations qui figurent à l'annexe 1. Toutefois, nous avons employés les valeurs du coefficient psychrométrique utilisé pour les tables, c'est-à-dire $6{,}4309 \times 10^{-4}$ (° K)$^{-1}$ pour un abri ventilé et $7{,}7170 \times 10^{-4}$ (° K)$^{-1}$ pour un abri non ventilé. Le lecteur doit cependant tenir compte du fait que ces valeurs peuvent changer, car des recherches sont encore en cours sur la valeur du coefficient psychrométrique (Fan, 1987; Wylie et Lalas, 1981). Il faut cependant remarquer que, du point de vue opérationnel, un coefficient psychrométrique

révisé ne changerait rien de façon significative au calcul de l'humidité relative.

Résultats

Comme on peut le voir à l'annexe 1, l'humidité relative varie grandement en fonction de la température et, à un moindre degré, de la pression atmosphérique. Cette pression n'a pas été mesurée à Branstead Field, mais elle était la même dans les deux abris. Elle a été fixée à 1 000 mbar dans l'équation de Regnault, ce qui a introduit une erreur inférieure à 1 %. Les températures des deux abris ont été étroitement surveillées. Dans l'abri non ventilé, les températures étaient beaucoup plus élevées que dans l'abri ventilé. La température ambiante (du thermomètre sec) dans l'abri non ventilé était en moyenne de 0,2° C plus élevée que celle dans l'abri ventilé. Dans l'abri non ventilé, la température du thermomètre mouillé était en moyenne d'environ 0,6° C plus élevée. Du point de vue statistique, ces différences sont significatives au niveau de 1 % ($p \leq 0{,}01$) si l'on utilise le test t. Les températures plus élevées des thermomètres secs et mouillés ont eu pour effet net une augmentation de l'humidité relative dans l'abri non ventilé lorsque le coefficient psychrométrique non corrigé ($6{,}4309 \times 10^{-4}$) a été utilisé (figure 3). Nous incluons ce graphique parce que, dans un certain nombre de stations au Canada, on s'est parfois servi du coefficient psychrométrique non corrigé. Lorsque le bon coefficient ($A = 7{,}7170 \times 10^{-4}$) est utilisé pour l'abri non ventilé, il y a une très bonne concordance entre les deux valeurs de l'humidité relative (figure 4).

En utilisant l'humidité relative comme valeur de référence, calculée à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri ventilé, nous avons porté en graphique la performance de tous les autres instruments. Les figures 5 à 7 montrent la différence entre les lectures des thermohygromètres et l'humidité relative de référence. Les trois instruments, indépendamment de l'abri où ils étaient installés, donnaient des lectures plus élevées que l'humidité relative de référence. Les figures 8 et 9 comparent l'humidité relative de référence avec les lectures du dispositif Vaisala dans les abris ventilé et non ventilé. Les deux graphiques sont semblables, et la majorité des valeurs tracent assez bien une ligne droite. Dans la région des valeurs élevées de l'humidité relative (entre 70 et 100 %), les valeurs se déplacent d'avantage. En outre, certaines valeurs aberrantes sont probablement dues au mouvement physique du détecteur d'un abri à l'autre. Les lectures de l'humidité relative obtenues à l'aide du détecteur PCRC-11 semblent donner une courbe non linéaire, et il existe de fortes déviations dans la région des valeurs élevées de l'humidité relative (figure 10).

L'erreur quadratique moyenne (EQM) a été calculée à l'aide de l'équation [4] pour chaque mesure de l'humidité relative.

$$EQM = \frac{1}{N} \Sigma |HR-E|^2 \qquad [4]$$

Dans cette équation, N est le nombre d'observations, HR est la valeur réelle de l'humidité relative (ici calculée à l'aide des équations de Goff-Gratch en utilisant les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri ventilé), et E est la valeur estimée, lue directement sur l'instrument ou calculée au moyen de l'équation de Goff-Gratch en utilisant les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé. La tableau 1 indique l'erreur quadratique moyenne ainsi que le biais dont la valeur peut être calculée selon l'équation suivante:

$$\text{Biais} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (E-HR) \qquad [5]$$

Un biais négatif indique que la valeur estimée est en moyenne inférieure à la valeur réelle. L'erreur quadratique moyenne peut servir de mesure relative afin de classer les divers instruments selon leur fiabilité. Nous avons réparti les instruments en trois groupes généraux d'après les résultats de la première rangée du tableau 1. Le premier groupe comprend les thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé qui permettent de calculer l'humidité relative avec la plus faible erreur quadratique moyenne. Le deuxième groupe comprend le dispositif Vaisala et le détecteur PCRC-11 qui fonctionnent assez bien (erreur quadratique moyenne relativement peu élevée). Le dernier groupe comprend les thermohygromètres dont la performance est piètre (forte erreur quadratique moyenne). La deuxième rangée du tableau 1 indique les erreurs lorsque l'humidité relative est faible (inférieure à 60 %). Nous avons fait cette classification parce que les jours de faible humidité relative sont des jours actifs en ce qui concerne la protection contre

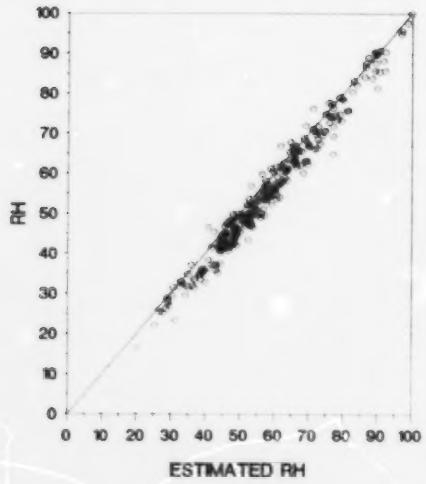


Figure 3. Humidité relative calculée à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans un abri non ventilé, comparée à celle d'un abri ventilé en utilisant le coefficient psychrométrique $A = 6{,}4309 \times 10^{-4}$ $(^{\circ}C)^{-1}$. La courbe indique que les valeurs tracent une ligne droite.

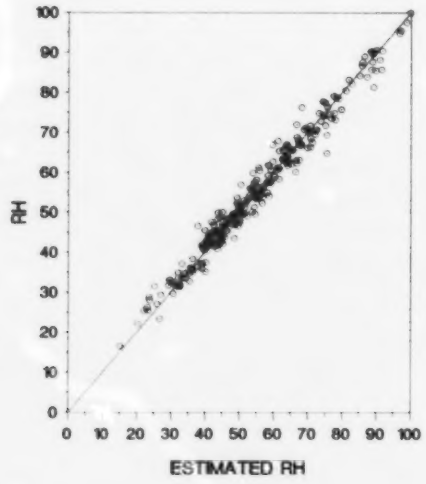


Figure 4. Humidité relative calculée à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans un abri non ventilé, comparée à celle d'un abri ventilé en utilisant le coefficient psychrométrique corrigé $A = 7{,}7170 \times 10^{-4}$ $(^{\circ}C)^{-1}$ pour l'abri non ventilé et le coefficient $6{,}4309 \times 10^{-4}$ $(^{\circ}C)^{-1}$ pour l'abri ventilé.

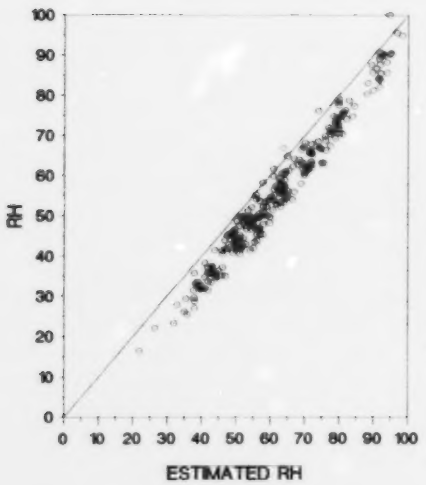


Figure 5. Humidité relative mesurée à l'aide d'un thermohygromètre dans l'abri ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

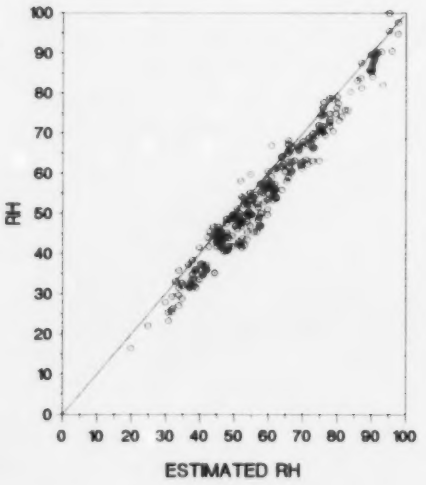


Figure 6. Humidité relative mesurée à l'aide du thermohygromètre n° 1 dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

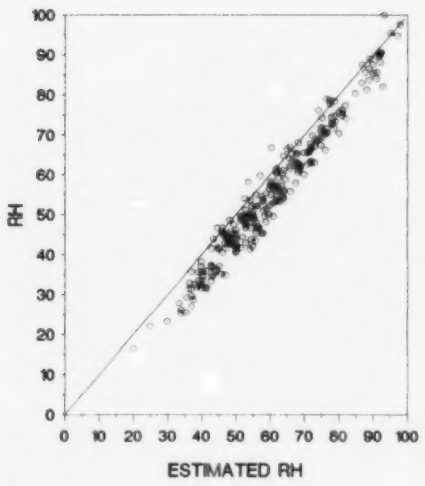


Figure 7. Humidité relative mesurée à l'aide du thermohygromètre n° 2 dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence.

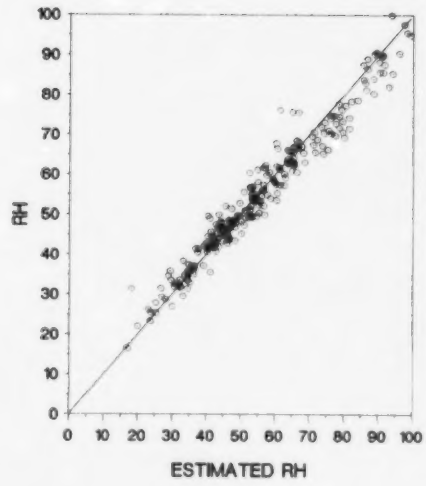


Figure 8. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du dispositif Vaisala dans l'abri ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

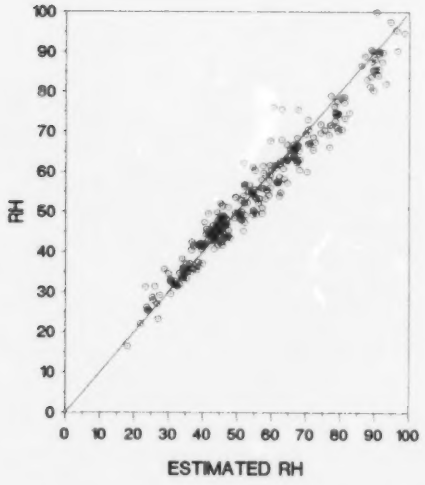


Figure 9. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du dispositif Vaisala dans l'abri non ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

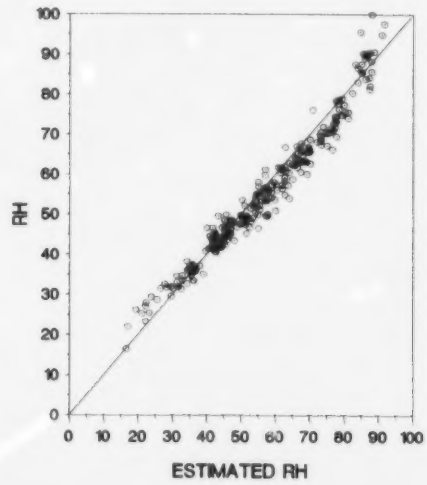


Figure 10. Valeurs de l'humidité relative obtenues à l'aide du détecteur PCRC-11 dans l'abri non ventilé, comparées à celles de l'humidité relative de référence.

Tableau 1. Erreur quadratique moyenne (EQM) et biais pour différentes méthodes de calcul de l'humidité relative dans tous les cas et lorsque l'humidité relative est faible (humidité relative < 60 %).

	Observations	Humidité relative abri non ventilé		Dispositif Vaisala abri ventilé		Thermohygromètre abri ventilé		Détecteur PCRC-11		Thermohygromètre n° 1 abri non ventilé		Thermohygromètre n° 2 abri non ventilé		Dispositif Vaisala abri non ventilé	
		EQM	BIAIS	EQM	BIAIS	EQM	BIAIS	EQM	BIAIS	EQM	BIAIS	EQM	BIAIS	EQM	BIAIS
Tous les cas	242	8,11	-0,04	15,51	0,45	50,46	6,41	14,66	1,20	26,47	3,91	36,99	4,99	17,74	0,75
Humidité relative faible*	149	6,85	-0,37	9,73	-0,28	55,56	6,88	11,72	0,74	29,42	4,19	44,36	5,76	11,22	0,00

* Humidité relative < 60 %

Tableau 2. Erreur quadratique moyenne (EQM) et biais pour l'humidité relative calculée d'après les températures mesurées dans l'abri non ventilé, dans différentes conditions en utilisant des thermomètres secs et mouillés.

	Observations	Humidité relative abri non ventilé	
		EQM	BIAIS
Tous les cas	242	8,11	-0,04
Humidité relative faible (< 60 %)	149	6,85	-0,37
Temps ensoleillé	77	7,59	-0,54
Temps nuageux	93	7,81	0,41
Temps calme	135	8,91	0,68
Temps venteux	46	5,12	-0,71

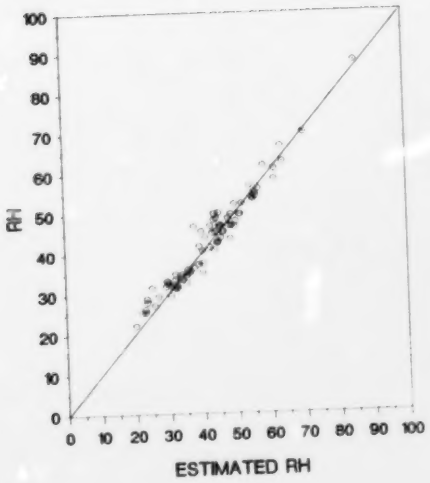


Figure 11. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps ensoleillé.

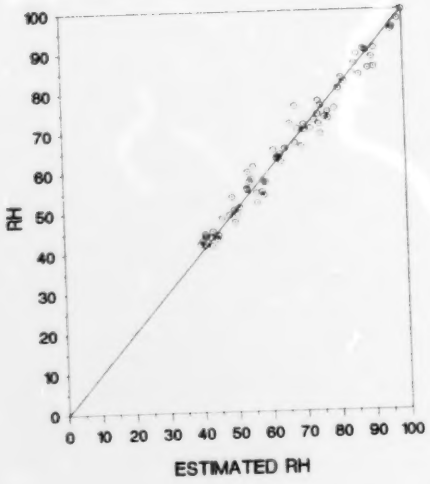


Figure 12. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps nuageux.

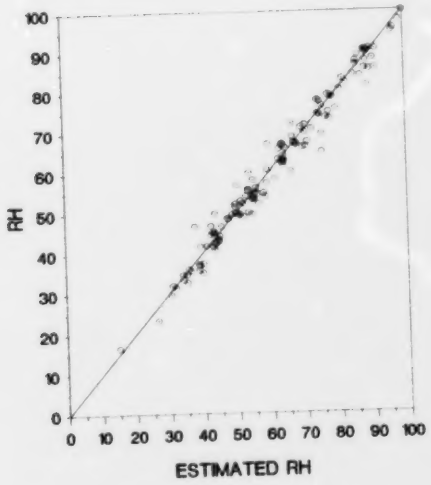


Figure 13. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps calme.

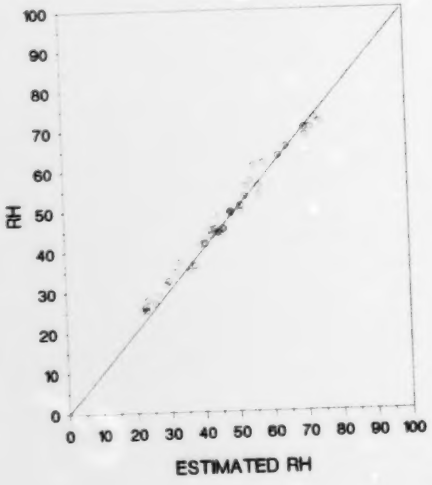


Figure 14. Humidité relative calculée d'après les températures des thermomètres secs et mouillés dans l'abri non ventilé, comparée à l'humidité relative de référence, par temps venteux.

les incendies. Comme on peut le voir par les résultats, l'erreur quadratique moyenne diminue dans le cas des instruments des groupes 1 et 2, alors qu'elle augmente dans le cas des thermohygromètres (groupe 3).

Le tableau 2 montre les effets du rayonnement solaire et du vent sur la mesure de l'humidité relative dans l'abri non ventilé, compte tenu des quatre conditions générales: par temps venteux, calme, ensoleillé et nuageux. Par temps venteux, la vitesse du vent est supérieure à 7 km/h; par temps calme, elle est égale ou inférieure à 3 km/h. L'erreur quadratique moyenne et le biais n'ont pas été calculés pour des vents de 3 à 7 km/h. Le temps ensoleillé indique un rayonnement solaire de 700 W/m^2 ou plus, mesuré au pyranomètre, et le temps nuageux, un rayonnement de 300 W/m^2 ou moins. L'erreur quadratique moyenne et le biais n'ont pas été calculés pour un rayonnement solaire compris entre 300 et 700 W/m^2. Les figures 11 à 14 montrent comment l'humidité relative change en fonction des conditions dans les deux abris .

Discussion

D'après les tableaux 1 et 2, l'humidité relative, calculée à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés dans un abri non ventilé, est généralement acceptable. Si l'on examine le tableau 2 et les figures 11 à 14, on peut voir que la performance change quelque peu selon les conditions environnementales. Par exemple, par temps venteux, les valeurs obtenues pour les deux abris concordent en général, bien que celles de l'abri non ventilé soient en moyenne trop faibles (biais de -0,71). Par temps nuageux, les valeurs concordent bien, mais la majorité des résultats indiquent une humidité relative supérieure à 60 %, ce qui intéresse peu le personnel qui s'occupe de la protection contre les incendies. Par temps ensoleillé, l'erreur quadratique moyenne est comparable à celle par temps nuageux, sauf que le biais est différent. Les valeurs de l'humidité relative par temps ensoleillé dans l'abri non ventilé sont en moyenne de 0,41 % moins élevée, ce que l'on pouvait prévoir, car les températures dans l'abri non ventilé étaient plus élevées. D'après Sparks (1972), les abris Stevenson surchauffent en plein soleil, mais il est un peu inquiétant qu'il y ait une dispersion considérable des valeurs dans la figure 11, en plusieurs points de la courbe, et que les différences d'humidité relative soient de 5 % ou plus. C'est par temps calme que les valeurs s'ajustent le moins; lorsque la vitesse du vent est faible, il n'y a pas assez d'aération naturelle, donc la température du thermomètre mouillé augmente dans l'abri non ventilé.

Par temps calme, l'humidité relative dans l'abri non ventilé montait en moyenne de 0,68 % et variait considérablement, comme on peut le voir à la figure 13. Ces lectures indiquent que, même si les résultats sont bons de point de vue des statistiques (tableau 1), l'utilisation des abris non ventilés peut donner lieu à d'importantes erreurs individuelles par temps calme ou ensoleillé. En revanche, par temps venteux, on peut avoir confiance dans les résultats obtenus dans l'abri non ventilé. Aucune combinaison des quatre conditions (comme un temps ensoleillé et calme) n'est présentée, puisque le nombre de données simples n'était pas suffisant.

Les thermohygromètres, à l'encontre du dispositif Vaisala et du détecteur PCRC-11, ne permettent pas la mesure juste de l'humidité relative. Toutefois, le lecteur doit tenir compte du fait qu'un seul dispositif Vaisala et qu'un seul détecteur PCRC-11 ont été utilisés. Au cours d'autres essais (Muller et Beekman, 1987), le dispositif Vaisala n'a pas bien fonctionné à cause de l'hystérésis.

En outre, nous n'avons pas pris en considération le temps de réponse des divers détecteurs d'humidité relative. Le temps de réponse peut varier de façon significative, et une partie de l'erreur quadratique moyenne peut être due à ce fait. Pour tenir compte du temps de réponse, il faudra comparer minutieusement les détecteurs entre eux.

L'effet des erreurs de l'humidité relative sur le calcul de l'IFM doit être étudié. En vérité, une étude de sensibilité de l'IFM en fonction des quatre conditions atmosphériques est nécessaire. Turner et Lawson (1978) ont présenté une brève discussion sur la sensibilité de l'IFM, mais il reste beaucoup à faire. Même si nous n'avons pas traité cette question, il est intuitivement évident que les erreurs de l'humidité relative peuvent entraîner des erreurs dans le calcul de l'IFM. En outre, les erreurs peuvent être cumulatives en raison du retard de réponse inhérent au système de l'IFM.

Il peut exister de nombreuses sources d'erreurs dans la mesure ou le calcul de l'humidité relative. Il y a des erreurs mécaniques inhérentes aux instruments qui peuvent être réduites grâce à un étalonnage régulier. Il peut aussi y avoir des erreurs de méthode. Par exemple, la mesure de l'humidité relative à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés est fonction de la pression atmosphérique. Puisque la plupart des stations météo-incendie ne mesurent pas cette pression, cela entraîne des erreurs. En outre, les tables (Service canadien des forêts, 1984), utilisées pour calculer l'humidité relative à l'aide des températures des thermomètres secs et mouillés, comportent de grands intervalles de 0,5° C. Le fait d'arrondir les valeurs de l'humidité relative peut également causer des erreurs de plus de 3 %. Nous aimerions que les tables soient remplacées par les équations de Goff-Gratch. Bien entendu, il est toujours probable qu'une erreur humaine cause des inexactitudes. Par conséquent, on peut obtenir des résultats plus justes en lisant directement l'humidité relative à l'aide d'un instrument fiable plutôt qu'en la calculant par la méthode à plusieurs étapes utilisant les températures des thermomètres secs et mouillés. Wylie et Lalas (1981) présentent une discussion plus complète des erreurs reliées à la mesure de l'humidité relative.

Enfin, il existe d'autres moyens de connaître l'humidité relative. Par exemple, à l'aide de la température du thermomètre sec et du point de rosée, il est possible de calculer l'humidité relative. L'équation qui établit un rapport entre le point de rosée et l'humidité relative comporte les mêmes hypothèses et les mêmes problèmes que l'équation psychrométrique, mais la mesure du point de rosée présente des avantages: il existe un certain nombre d'instruments permettant d'enregistrer avec exactitude le point de rosée qui n'est pas tellement sujet au changement, c'est-à-dire que l'humidité relative varie beaucoup avec la température, ce qui n'est pas le cas pour le point de rosée. L'humidité relative peut varier rapidement en quelques heures, tandis que le point de rosée demeure relativement constant. Une autre façon de procéder consisterait à automatiser complètement le système, ce qui éliminerait l'erreur humaine. Toutefois, le fonctionnement du psychromètre est mieux compris par comparaison avec un système automatisé. Il est ainsi plus facile de déceler les problèmes si un cas inhabituel se présente. Les observations pourraient être entrées dans un ordinateur, et les résultats seraient les composantes de l'IFM. En fait, certaines provinces ont déjà automatisé en tout ou en partie leur réseau de stations météo-incendie.

Remerciements

Nous voulons exprimer notre vive reconnaissance de l'examen minutieux du présent rapport à R. Silversides et à D.J. McKay. Nous remercions également B.M. Wotton, E. Andersen, L. Roy et S. Handke du dévouement avec lequel ils ont accompli leur travail dans leur domaine de compétence.

Références

Abbott, P.F.; Tabony, R.C. 1985. The estimation of humidity parameters. Meteorol. Mag. 114:49-56.

Blackadar, A.K. 1983. Using home computers to study the weather. Weatherwise 36:193-195.

Fan, J. 1987. An attempt to recast the psychrometer coefficient A of the Assman Psychrometer by comparison with the WMO reference psychrometer. Pages 213 à 217, Proc. Sixth Symp. on Meteorol. Observations and Instrumentation. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.

Fan, J.; Whiting, J. 1987. Calculation and accuracy of Humidity Value. Pages 237 à 240, Proc. Sixth Symposium on Meteorol. Observations and Instrumentations, Nouvelle-Orléans, du 12 au 16 janvier 1987. Am. Meteorol. Soc., Boston, MA.

Goff, J.A. 1965. Saturation pressure of water on the new Kelvin scale: Humidity and moisture. Vol. III, 289-292. Reinhold, New York.

Goff, J.A.; Gratch, S. 1945. Thermodynamic properties of moist air. Trans. Am. Soc. Heat Vent. Eng. 51:125-157.

Hyland, W. 1985. A comparison of some thermodynamic properties of H_2O from 273.15 to 473.15 K as formulation 1983 ASHRAE tables and the 1983 NBS NRC steam tables. Pages 29-36, Proc. 1985 Internat. Symp. Moisture and Humidity. Instrument Soc. Am., Research Triangle Park, North Carolina.

List, R.J. 1984. Smithsonian meteorological tables. 6e édition, rev. Smithsonian Inst. Press, Washington, DC.

Magnus, G. 1844. Versuche über die Spannkrafte des Wasserdampfes. Ann. Phys. Chem. Poggendorff. 61:225.

Muller, S.H.; Beekman, P.J. 1987. A test of commercial humidity sensors for use at automatic weather stations. J. Atmos. Oceanic Technol. 4:731-735.

Organisation météorologique mondiale. 1968. Annexe 2C - Agrometeorological observation in forest areas. Supplément n° 2, avril 1968, Guide to agricultural meteorological practices. Genève. Rapport n° 134. TP. 61.

Organisation météorologique mondiale. 1983. Guide to meteorological instruments and methods of observation. Genève. Rapport OMM n° 8, 5e éd.

Revfeim, K.J.A.; Jordan, R.B. 1976. Precision of evaporation measurements using the Bowne ratio. Boundary-Layer Meteorol. 10:97-111.

Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 1976. Tables psychrométriques Downsview (Ont.).

Service canadien des forêts. 1984. Tables de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne. Environnement Canada, Ottawa. Rapp. tech. for. 25.

Sparks, W.R. 1972. The effect of thermometer screen design on the observed temperature. Organisation météorologique mondiale, Rapport N° 315. Genève, Suisse.

Tabata, S. 1973. A simple but accurate formula for the saturation vapour pressure over liquid water. J. Appl. Meteorol. 12:1410-1411.

Turner, J.A.; Lawson, B.D. 1978. Guide de météorologie dans la méthode canadienne d'évaluation des dangers d'incendie de forêt. Environnement Canada, Service canadien des forêts. Rapport d'information BC-X-177.

Van Wagner, C.E. 1987. Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. Service canadien des forêts. Rapp. tech. for. 35.

Van Wagner, C.E.; Pickett, T.L. 1985. Équations et programme FORTRAN de l'Indice Forêt-Météo de la méthode canadienne. Service canadien des forêts. Rapp. tech. for. 33.

Wexler, A. 1976. Vapour pressure formulation for water in the range 0 to 100°C: A revision. Washington, Nat. Bureau of Standards J. Res. 80A:775.

Wexler, A. 1977. Vapour pressure formulation for ice. Washington, Nat. Bureau of Standards J. Res. 81A:5-20.

Wylie, R.G.; Lalas, T. 1981. The WMO Psychrometer. Div. of Appl. Physics, CSIRO, Australia. Tech. Paper No. 3.

Annexe I

Il est possible de déterminer l'humidité relative (HR) d'après les équations [1] et [2] et à l'aide d'une équation qui permet de calculer la pression de saturation de la vapeur (e_s).

$$HR = \frac{e}{e_s(T)} \times 100 \qquad [1]$$

$$e = e_s(T_w) - Ap\,(T-T_w) \qquad [2]$$

Équation de Goff-Gratch permettant de calculer e_s (List, 1984):

Si T est compris entre 273,16 et 373,16° K,

$$\log e_s = -7{,}90298\,(373{,}16/T-1) + 5{,}2808\,\log_{10}(373{,}16/T)$$

$$- 1{,}3816 \times 10^{-7}\,(10^{11{,}344[1-(T/373{,}16)]}-1) + 8{,}1328 \times 10^{-3}\,(10^{-3{,}49149[(373{,}16/T)-1]}-1)$$

$$+ \log_{10} 1013{,}246 \qquad [6]$$

en substituant l'équation [2] à l'équation [1], on obtient:

$$HR = \frac{e_s(T_w) - Ap\,(T-T_w)}{e_s(T)} \times 100 \qquad [7]$$

A est connu ($6{,}4309 \times 10^{-4}$ (° K)$^{-1}$ pour les abris ventilés); p est la pression en hPa. Les valeurs de T et T_w sont en ° K et elles doivent être mesurées. Pour obtenir les pressions de saturation de la vapeur e_s (T_w) et e_s (T), il s'agit de résoudre l'équation de Goff-Gratch [6]. L'humidité relative peut être calculée ensuite.